

УДК 614.844.2+614.842.612

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ВОДЯНОГО ТУМАНА

Пахомов Георгий Борисович, Елфимова Марина Владимировна, Тужиков Евгений Николаевич
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. Высокодисперсный водяной туман (ВВТ) представляет собой устойчивый аэрозоль, состоящий из воздушной дисперсионной среды и мельчайших капель воды, диаметр которых составляет всего несколько микрон. В последние годы активно изучается использование ВВТ для пожаротушения в замкнутых объемах, поскольку он является экологически чистым и высокоэффективным средством, обладающим газообразными свойствами. Практическое применение ВВТ позволит осуществить эффективное объемное тушение и значительно снизить ущерб от пожаров. В настоящей работе приводятся результаты исследований оптической плотности высококонцентрированного ВВТ модифицированного малыми добавками высших жирных насыщенных спиртов (ВЖС). Их монослой, образующийся на поверхности капли воды, многократно замедляет процесс испарения, что способствует повышению устойчивости ВВТ, необходимой для эффективного тушения. Измерения оптической плотности проводились в закрытой испытательной камере, где ВВТ создавался с использованием ультразвукового генератора. При увеличении концентрации ВЖС и времени поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере устойчивость плотного ВВТ увеличивается за счет образования монослоя на поверхности капель. Проведен анализ возможных механизмов увеличения устойчивости ВВТ, что может сыграть важную роль в процессе объемного пожаротушения.

Ключевые слова: высокодисперсный водяной туман, объемное пожаротушение, ультразвуковое распыление, монослой, высший жирный спирт

Для цитирования: Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Экспериментальное исследование повышения устойчивости высокодисперсного водяного тумана // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 78–89.

EXPERIMENTAL STUDY OF INCREASING THE STABILITY OF HIGHLY DISPERSED WATER MIST

Georgy B. Pakhomov, Marina V. Elfimova, Evgenij N. Tuzhikov
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. Highly dispersed water mist is a stable aerosol consisting of an air dispersion medium and tiny water droplet with a diameter of only a few microns. In recent years, the use of highly dispersed water mist for fire extinguishing in closed spaces has been actively studied, since

it is an environmentally friendly and highly effective agent with gaseous properties. Practical application of highly dispersed water mist will allow for effective volumetric extinguishing and significantly reduce damage from fires. This paper presents the results of studies of the optical density of highly concentrated dispersed water mist modified with small additives of higher fatty saturated alcohols. Their monolayer, formed on the surface of a water droplet, repeatedly slows down the evaporation process, which contributes to an increase in the stability of highly dispersed water mist necessary for effective extinguishing. Optical density measurements were carried out in a closed test chamber, where highly dispersed water mist was created using an ultrasonic generator. With an increase in the concentration of higher fatty saturated alcohols and the time of maintaining a given concentration of highly dispersed water mist in the test chamber, the stability of the dense of highly dispersed water mist increases due to the formation of a monolayer on the surface of the droplets. The analysis of possible mechanisms for increasing the stability of highly dispersed water mist is carried out, which can play an important role in the process of volumetric fire extinguishing.

Keywords: highly dispersed water mist, volumetric fire extinguishing, ultrasonic atomization, monolayer, higher fatty alcohol

For Citation: Pakhomov G. B., Elfimova M. V., Tuzhikov E. N. Experimental study of increasing the stability of highly dispersed water mist // Technospheric safety. 2025. № 1 (46). pp. 78–89.

Введение

Как экспериментальные, так и теоретические исследования показали, что эффективность объемного пожаротушения повышается за счет увеличения дисперсности воды, которая распыляется и используется для тушения [1]. Для большей результативности этого процесса требуется создать за короткий промежуток времени водные аэрозоли, обладающие высокой стабильностью, дисперсностью и концентрацией.

В последние годы активно ведутся теоретические и экспериментальные исследования объемного тушения высокодисперсным водяным туманом (далее — ВВТ), создаваемым с помощью ультразвуковой технологии. Этот способ основан на воздействии ультразвуковых колебаний, генерируемых пьезокерамическим излучателем с частотой свыше 1 МГц, на слой воды и водных растворов [2].

Развитие обозначенного направления связано как с совершенствованием ультразвуковых технологий распыления, так и с несомненными преимуществами получаемого с помощью ультразвука ВВТ по сравнению с другими способами диспергации жидкостей. Срок жизни низкоконцентрированного ВВТ в замкнутом объеме со 100 % относительной влажностью может составлять несколько часов [3], а образующие туман капли имеют очень узкое распределение по размерам со средним диаметром всего в несколько микрон [4].

Практическим, в т.ч. полномасштабным, экспериментам по ликвидации очага возгорания с применением ВВТ посвящен ряд работ [5, 6, 7], при этом тушащая концентрация ВВТ может достигать 100 г/м³ [5, 7], что является одним из самых низких значений среди всех известных огне-тушащих веществ.

Ультразвуковые генераторы ВВТ, которые могут диспергировать около 1 л/мин и при незначительных изменениях в конструкции могут найти применение в системах объемного пожаротушения, уже имеются в продаже. Примечательно, что указанная технология ультразвукового распыления воды в настоящее время является единственным методом, способным одновременно достичь высокой производительности, однородности и дисперсности.

Следует указать, что наряду с такими механизмами прекращения горения, как охлаждение, разбавление, изоляция и снижение теплопередачи, при тушении ВВТ выявлены механизмы химического торможения отдельных стадий реакции горения [8]. Таким образом, при применении ВВТ реализуются практически все механизмы прекращения горения.

Создание и поддержание высокой концентрации ВВТ, необходимой для эффективного объемного пожаротушения, сталкивается со значительными трудностями. Так, например, с повышением концентрации ВВТ скорость его разрушения или «старения» быстро увеличивается [5, 9]. Для полной ликвидации горения, особенно тлеющего, необходимо достаточно длительно поддерживать концентрацию ВВТ выше тушащей [5].

Получение ультразвукового ВВТ характеризуется низкой расчетной технологической эффективностью. Так, высокопроизводительные ультразвуковые генераторы ВВТ потребляют до 0,6 кВт для распыления 100 мл/мин воды. Однако даже незначительное повышение этой эффективности, например искусственное замедление процесса «старения» тумана, может значительно ускорить внедрение ультразвуковых технологий для объемного пожаротушения.

Процесс искусственного туманообразования можно разделить на две части: увлажнения воздуха до 100 % относительной влажности, а затем создание атмосферы витающих — свободно перемещающихся в различных направлениях — мельчайших капелек воды [3].

Устойчивость, как и противоположенный процесс — разрушение туманов, обусловлена протеканием и взаимодействием процессов испарения, конденсации, коагуляции, коалесценции и седиментации в их дисперсной фазе. Применительно к объемному пожаротушению повышение устойчивости плотного (высоконцентрированного) ВВТ относится к замедлению указанных процессов при 100 % относительной влажности окружающего воздуха.

Согласно закону Стокса, подтвержденному многочисленными исследованиями, скорость седиментации (гравитационного осаждения) наиболее крупных капель в спектре ультразвукового ВВТ (10 мкм в нормальных условиях) составляет около 3 мм/с. Несмотря на столь небольшую скорость, гравитационное осаждение продолжает оставаться одной из основных причин низкой устойчивости плотного ультразвукового тумана. Это обстоятельство обуславливается перекоалесценцией, или Оствальдовским созреванием, — процессом, при котором происходит испарение мелких капель с последующей конденсацией образовавшихся паров на более крупных каплях при 100 % относительной влажности окружающего воздуха. Так происходит вследствие того, что мелкие капли имеют большую кривизну поверхности, чем крупные, и потому давление насыщенных паров над ними будет выше, чем над крупными каплями.

Указанный процесс приводит к тому, что даже при 100 % относительной влажности происходит быстрое уменьшение мелких и увеличение крупных капель, особенно в условиях плотного тумана, что вызывает значительное увеличение интенсивности и других процессов, приводящих к разрушению ВВТ: седиментации, коагуляции и коалесценции.

Конденсированные пленки, или монослои, образованные на поверхности воды, могут замедлять скорость испарения во много раз. Монослои представляют собой поверхностные пленки толщиной в одну молекулу, покрывают всю поверхность воды и образуются органическими амфифильными молекулами, такими как высшие жирные насыщенные спирты (далее — ВЖС) и их производные [10].

Исследованию вопроса о замедляющем влиянии монослоев ВЖС в процессах испарения и конденсации воды посвящено большое количество работ [10, 11, 12]. Имеющиеся в этой области научные публикации о каплях воды микронных размеров сосредоточены на отдельных частицах и/или небольших коллективах частиц при относительной влажности окружающей атмосферы меньше 100 %. Из анализа литературы следует, что исследований влияния добавок ВЖС на устойчивость макрообъемов плотных ВВТ ранее не проводилось.

Нами не найдено сведений об исследованиях, посвященных повышению устойчивости плотных ВВТ в макрообъемах, применимых для объемного пожаротушения, с помощью монослоев ВЖС. Отсюда следует вывод об актуальности проведения соответствующих научно-исследовательских работ.

Экспериментальная методика

Исследования влияния монослоя ВЖС на устойчивость ВВТ проводились путем определения временных изменений оптической плотности водного аэрозоля, полученного в герметичной испытательной камере с помощью ультразвукового генератора ВВТ.

Оптическая плотность — это физическая величина, равная десятичному логарифму отношения интенсивности света, падающего на слой ВВТ, к интенсивности света, прошедшего через этот слой. Оптическая плотность однозначно характеризует концентрацию ВВТ в измеряемом слое, и ее изменение является часто применяемым критерием для определения устойчивости или скорости «старения» тумана.

Измерения оптической плотности ВВТ проводились с помощью серийного прибора «ИОПД-5М» [13], соединенным с компьютером, на котором записывались полученные данные в виде таблиц и графиков.

Для исследования влияния монослоя ВЖС на устойчивость ВВТ создан испытательный стенд (рис. 1), состоящий из герметичной испытательной камеры 1 с прозрачными окнами (условно не показаны). Свободный объем камеры — 84 л, а расстояние между окнами (зона измерения) — 0,4 м. Внутри камеры находился ультразвуковой генератор ВВТ 2. За пределами испытательной камеры вплотную к входному и выходному окнам размещались блок излучателя 3 и блок фотоприемника 4 инфракрасного луча 5. Указанные окна располагались в стенках испытательной камеры перпендикулярно световому лучу, и для предотвращения конденсации тумана на внутренних поверхностях они были покры-

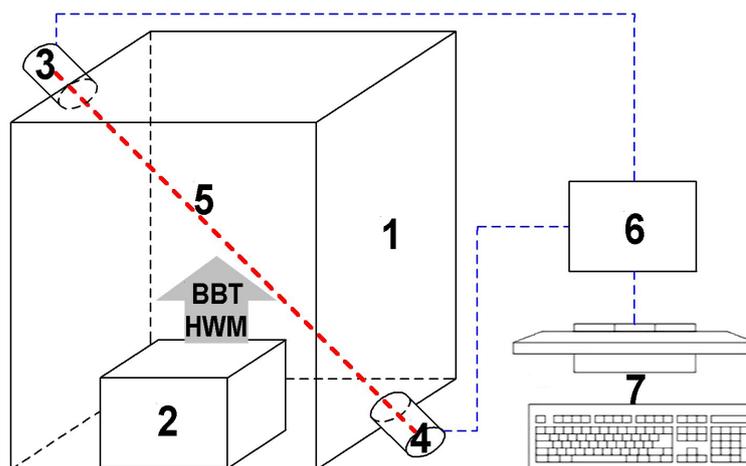


Рис. 1. Схема испытательного стенда для измерения оптической плотности ВВТ, где: 1 — испытательная камера; 2 — ультразвуковой генератор ВВТ; 3 — блок излучателя; 4 — блок фотоприемника; 5 — инфракрасный луч; 6 — блок управления прибора «ИОПД-5М»; 7 — компьютер

Fig. 1. Schematic diagram of the test bench for measuring the optical density of highly dispersed water mist where: 1 — test chamber; 2 — ultrasonic generator of highly dispersed water mist; 3 — emitter unit; 4 — photodetector unit; 5 — infrared beam; 6 — control unit of the device “IOPD-5M”; 7 — computer

ты гидрофобным составом. Блок управления 6 прибора «ИОПД-5М» соединялся с компьютером 7 по интерфейсу RS-232.

Используемый ультразвуковой генератор с регулируемым расходом ВВТ и частотой колебаний пьезокерамического излучателя 1,7 МГц генерирует капли со средним заутеровским диаметром в диапазоне 4–5 мкм. Ультразвуковой генератор дополнительно оснащен системой автоматического поддержания повышенной температурой распыляемой воды.

Прибор «ИОПД-5М» предназначен для измерения оптической плотности среды, через которую проходит инфракрасный луч с длиной волны в диапазоне 850–950 нм. Для управления измерительным процессом, обработки, отображения и сохранения на компьютере полученных от прибора «ИОПД-5М» данных использовалось поставляемое вместе с прибором программное обеспечение «ИОПД-5М Монитор» [13].

Из предыдущих исследований известно, что увеличение длины углеродной цепи ВЖС

с $n = 12$ до $n = 18$ уменьшает коэффициент испарения воды через монослой примерно в 300 раз. В то же время резкое увеличение коэффициента испарения с повышением температуры воды согласуется с приближением к температуре плавления ВЖС. При ее достижении защитное действие монослоя практически прекращается [12].

Вышеуказанные обстоятельства обусловили выбор смеси равных частей цетилового ($n = 16$) и стеарилового ($n = 18$) спиртов в качестве ВЖС при проведении настоящего исследования. Кроме того, указанный выбор связан с широким использованием этого реагента, а соответственно, с его дешевой и доступностью. Смесь цетилового и стеарилового спиртов масштабно применяется для замедления испарения воды из пресных водоемов в засушливых регионах. Температура плавления указанной смеси ВЖС находится в диапазоне 49–59 °С.

Выбранные ВЖС практически нерастворимы в воде. Для образования монослоя на каплях ВВТ необходимо равномер-

но распределить ВЖС внутри всего объема распыляемой воды, что достигается путем эмульгирования ВЖС в воде.

Стабильная эмульсия типа «масло в воде» готовилась следующим образом. Необходимое количество ВЖС растворялось в этиловом спирте. Этот раствор медленно вливалась в воду, нагретую до температуры ~ 70 °С, при интенсивном перемешивании с помощью высокоскоростного электрического миксера. Процесс продолжался до охлаждения полученной жидкости ниже температуры плавления ВЖС. За это время практически весь этиловый спирт испарялся. Аналогичная процедура получения эмульсии ВЖС в воде применялась в других научных работах, посвященных исследованию влияния монослоя ВЖС на испарение капель воды [14].

Предварительные эксперименты по ультразвуковому распылению полученных эмульсий показали, что с увеличением концентрации ВЖС в эмульсии интенсивность образования ВВТ снижалась. При концентрации ВЖС свыше $\sim 0,25$ г/л и температуре эмульсии 25 °С образование ВВТ практически не происходит. Это обстоятельство объясняется тем, что вязкость эмульсии повышается с ростом концентрации ВЖС, а производительность ультразвукового генератора ВВТ уменьшается с увеличением вязкости распыляемой жидкости.

В настоящем исследовании для снижения вязкости эмульсий применялось автоматическое поддержание повышенной до 40 °С температуры всех распыляемых жидкостей внутри генератора ВВТ. При этом нагреванию подвергался только небольшой объем жидкости ~ 100 мл, который непосредственно контактировал с пьезокерамическим излучателем.

Исследования проводились на чистой воде и при двух значениях концентрации ВЖС в эмульсии — 0,1 г/л и 0,2 г/л. Расход ВВТ около 7 г/мин поддерживался примерно постоянным во всех экспериментах по определению оптической плотности.

Схема экспериментов была следующей. В испытательной камере включался ультразвуковой генератор ВВТ, при достижении удельной оптической плотности — 7,5 дБ/м — генератор выключался, одновременно с выключением генератора начинались запись полученных данных и вывод на экран компьютера в виде графика зависимости измеренных значений оптической плотности от времени эксперимента.

Значение удельной оптической плотности — 7,5 дБ/м — было выбрано на основании максимального значения диапазона измерений оптической плотности для прибора «ИОПД-5М» — 3 дБ, и длины зоны измерений в испытательной камере — 0,4 м. Кроме указанного обстоятельства значение 7,5 дБ/м примерно соответствует минимальной тушащей концентрации для ВВТ ~ 100 г/м³, что следует из эмпирической формулы, приведенной в работе [15].

Давление, температура и относительная влажность окружающего воздуха во время всех экспериментов были вблизи 0,098 МПа, 298 К и 30 % соответственно. Для каждого опытного сценария проводилось не менее трех экспериментов с одинаковыми условиями в пределах ошибки измерений.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных экспериментов по определению оптической плотности ВВТ было установлено, что даже небольшие

добавки ВЖС оказывают существенное стабилизирующее действие на водный туман.

На рис. 2 приведены графики, показывающие ход изменения удельной оптической плотности (D , дБ/м) со временем (t , с).

При увеличении концентрации ВЖС от 0 (график 1) до 0,2 г/л (график 3) время двукратного уменьшения удельной оптической плотности (от 7,5 до 3,75 дБ/м) выросло примерно в два раза — от 33 до 63 с. Из све-

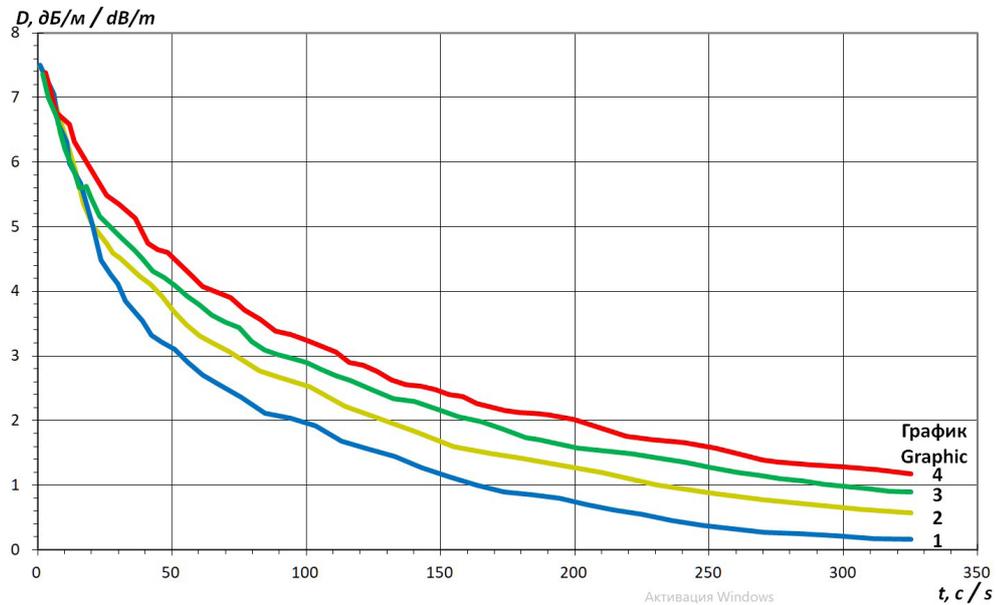


Рис. 2. Зависимости удельной оптической плотности ВВТ от времени для различных концентраций ВЖС: график 1 — 0 г/л, график 2 — 0,1 г/л, графики 3 и 4 — 0,2 г/л; график 4 — увеличено на 5 мин время нагнетания ВВТ в испытательную камеру

Fig. 2. Specific optical density dependencies of highly dispersed water mist on time for different concentrations of higher fatty saturated alcohols: graph 1 — 0 g/l, graph 2 — 0,1 g/l, graphs 3 and 4 — 0,2 g/l; graph 4 — injection time of highly dispersed water mist into the test chamber increased by 5 min

дений, приведенных на рис. 2, следует, что при добавке в воду всего 0,02 мас. % ВЖС значительно повышается устойчивость ВВТ.

Обнаруженное повышение устойчивости ВВТ при малых добавках ВЖС согласуется с результатами других работ, где указывается в частности, что скорость испарения капель воды, полностью покрытых монослоем ВЖС, уменьшается на много порядков [10, 11, 12].

Ожидалось, что указанное драматическое снижение скорости испарения, даже при малых добавках ВЖС, должно привести к многократному повышению устойчивости плотного ВВТ, однако, исходя из результатов проведенных экспериментов, этого не про-

изошло. Указанное обстоятельство может быть объяснено как сравнительной инерционностью процесса образования конденсированного монослоя, так и недостаточной концентрацией ВЖС.

Процесс образования монослоя может быть представлен двумя стадиями: выход ВЖС из объема на поверхность капли и, если концентрации ВЖС недостаточно для образования монослоя, уменьшение капли за счет испарения до размера, достаточного для образования конденсированного монослоя. В работе [12] указывается, что при концентрациях ВЖС, аналогичных применяемым в настоящем исследовании, диаметр

исходной капли при испарении уменьшался примерно в 1,3 раза, прежде чем слой ВЖС покрывал всю ее поверхность.

Для оценки влияния инерционности процесса образования конденсированного монослоя на устойчивость ВВТ была проведена дополнительная серия экспериментов при концентрации ВЖС 0,2 г/л. Отличие методики заключалось в том, что при достижении в камере ВВТ удельной оптической плотности 7,5 дБ/м ультразвуковой генератор продолжал работать еще 5 мин до его выключения, после чего начинались измерения. В остальном схема проведения измерений не отличалась от предыдущих опытов.

Из полученных результатов, приведенных на графике 4 рис. 2, следует, что увеличение времени поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере перед началом измерения оптической плотности приводит к заметному росту устойчивости ВВТ. Время двукратного уменьшения удельной оптической плотности (от 7,5 до 3,75 дБ/м) выросло примерно в 2,3 раза по сравнению с водой — от 33 (график 1) до 77 с (график 4). Этот эффект может быть объяснен накоплением в объеме камеры капель ВВТ, на которых уже полностью сформировался конденсированный монослой ВЖС.

Пояснить указанный эффект можно следующим образом. В процессе переконденсации при исходной концентрации ВЖС в воде 0,2 г/л мелкие капли до образования монослоя уменьшаются в диаметре в ~1,3 раза [12], что, исходя из геометрических соображений, соответствует снижению объема и массы капель в 2,2 раза — 1,33. После этого происходит резкое уменьшение скорости испарения за счет образования монослоя ВЖС.

Следовательно, торможение процесса переконденсации происходит спустя некоторое время, в течение которого исходные капли ВВТ претерпевают значительные изменения: мелкие быстро уменьшаются, крупные увеличиваются. Большие капли — на их поверхности в тот же момент конденсируются пары воды — растут беспрепятственно, т. к. монослой ВЖС при разбавлении капли образоваться не может.

Величина указанных изменений находится в обратной зависимости как от исходной концентрации ВЖС, так и от исходного диаметра капель ВВТ, т. к. отношение объема и, следовательно, количества ВЖС к площади поверхности сферической капли — величина прямо пропорциональная диаметру капли.

Таким образом, увеличение времени поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере при 100 % относительной влажности и в присутствии ВЖС с концентрацией, недостаточной для образования монослоя на исходных каплях, приводит к ускоренному выводу крупных капель из объема ВВТ за счет седиментации и гравитационной коалесценции. Одновременно повышается концентрация мелких капель в ВВТ как за счет переконденсации, так и за счет продолжающего работать ультразвукового генератора.

Описанный механизм повышения устойчивости ВВТ может иметь большое значение при реализации объемного тушения, т. к. после достижения и превышения тушащей концентрации ВВТ необходимо поддерживать концентрацию на необходимом уровне еще некоторое время [5].

Результаты проведенных экспериментов позволяют заключить, что существенное повышение концентрации распыляемой эмульсии ВЖС может оказаться достаточно

для образования монослоя уже на исходных каплях ВВТ.

Как было показано выше, распыление более концентрированной эмульсии ВЖС при используемой частоте ультразвуковых колебаний невозможно из-за высокой вязкости эмульсии. В свою очередь, повышение температуры распыляемой эмульсии для снижения вязкости не должно приводить к плавлению ВЖС, при котором монослой разрушается.

Предполагается, что дальнейший поиск и исследование амфифильных органических соединений, образующих монослой на поверхности воды и при этом обладающих повышенной температурой плавления, позволит создать особо устойчивый плотный ультразвуковой ВВТ для объемного пожаротушения.

Полученные результаты могут послужить основой для постановки в дальнейшем более обширных и детальных исследований по увеличению устойчивости высококонцентрированных ВВТ для целей пожаротушения.

Выводы

Из анализа научных работ по применению ультразвукового ВВТ для объемного пожаротушения и повышению его устойчивости сделан вывод об актуальности проведения исследований по влиянию монослоя ВЖС на устойчивость макрообъемов высококонцентрированного ВВТ. Повышение устойчивости плотных ВВТ является одним из ключевых факторов в развитии новейшей технологии объемного водяного пожаротушения.

Для исследования устойчивости плотного ВВТ, генерируемого ультразвуковым распылителем, был создан испытательный

стенд, с помощью которого проведены эксперименты по определению изменения оптической плотности ВВТ во времени при 100 % относительной влажности в испытательной камере.

Проведено определение удельной оптической плотности ВВТ в зависимости от времени эксперимента при миллипроцентных концентрациях ВЖС в специально приготовленных устойчивых водных эмульсиях, которые диспергировались ультразвуковым генератором. При увеличении концентрации ВЖС и времени поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере устойчивость плотного ВВТ увеличивается за счет образования монослоя на поверхности капель.

Проведен анализ возможных механизмов увеличения устойчивости ВВТ при увеличении времени поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере, на основании чего сделан вывод о заметном вкладе инерционности и первоначального быстрого испарения наиболее мелких капель в процессы переконденсации. Предложенный механизм повышения устойчивости ВВТ может сыграть важную роль в совершенствовании технологий объемного тушения.

Было обнаружено, что распыление эмульсии с концентрацией ВЖС выше ~0,25 г/л при используемой частоте ультразвуковых колебаний трудноосуществимо из-за ее высокой вязкости и относительно низкой температуры плавления ВЖС, превышение которой при распылении препятствует образованию монослоя.

В ходе экспериментов было установлено, что вопреки ожиданиям возможные для применения концентрации ВЖС в воде не позволили получить многократного уве-

личения устойчивости ВВТ. Максимальное увеличение устойчивости по сравнению с водой составило примерно 2,3 раза. Указанный результат объясняется тем, что еще до образования монослоя исходные капли ВВТ претерпевают значительные изменения: мелкие быстро уменьшаются, крупные увеличиваются.

Ожидается, что продолжение поиска и изучения амфифильных органических соединений, формирующих монослой на поверхности воды и обладающих повышенной температурой плавления, позволит разработать особенно устойчивый и плотный ультразвуковой туман для объемного пожаротушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности пожаротушения в замкнутом объеме тонкораспыленной водой / А. Л. Душкин [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2017. № 3. С. 60–69.
2. Murugan S., Vijayakumar P. Identification of ultrasonic frequency for water mist generation using piezoelectric transducer // Archives of Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 83 (2). pp. 74–78.
3. Мальгин Ю. В. Увлажнение воздуха туманом (теория и практика на примере ультразвукового увлажнителя) // С.О.К. 2007. № 10. С. 91–98.
4. Influence of liquid properties on ultrasonic atomization / A. Lozano et al. // ILASS2017. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/ILASS2017.2017.4588>.
5. Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Долгопериодические автоколебательные процессы при тушении пламени высокодисперсным водяным туманом // Техносферная безопасность. 2023. № 4 (41). С. 37–48.
6. Experimental and Numerical Study of Fire Suppression Performance of Ultra-Fine Water Mist in a Confined Space / T. Liang et al. // Procedia Engineering. 2013. Vol. 52. pp. 208–213.
7. Measurement of Absolute Oxygen Concentration by Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) in Very Fine Water Mist Environments / A. Awtry et al. // Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico May 4–6, 2004.
8. Hydrogen cloud explosion suppression by micron-size water mist / L. Yanchao et al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47 (55). pp. 23462–23470.
9. Мальгин Ю. В. Энергетика и дисперсность тумана, образованного ультразвуковым увлажнителем // С.О.К. 2020. № 3. С. 56–59.
10. Miles R., Davies J., Reid J. The influence of the surface composition of mixed monolayer films on the evaporation coefficient of water // Phys. Chem. Chem. Phys. 2016. Vol. 18 (29). pp. 19847–19858.
11. Frank E. Evaporation of water: with emphasis on applications and measurements. New York : CRC Press, 2018. 188 p.
12. Influence of organic films on the evaporation and condensation of water in aerosol / J. Davies et al. // Proc. Natl. Acad. Sci. 2013. Vol. 110 (22). pp. 8807–8812.
13. Измеритель оптической плотности дыма «ИОПД-5М» // СПЭК : сайт. URL: <http://spec.ru/products/id/143> (дата обращения: 12.02.2025).

14. Eisner H., Brookes F., Quince B. Stabilization of Water Mists // *Nature*. 1958. Vol. 182. P. 1724.
15. Зависимости для оценки дальности видимости в аэрозольных средах / Д. С. Фёдоров [и др.] // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2019. № 9–10 (135–136). С. 105–110.

REFERENCES

1. Features of fire extinguishing in a closed volume with fine spray water / A. L. Dushkin et al. // *Pozharovzryvzodobezopasnost*. 2017. № 3. pp. 60–69.
2. Murugan S., Vijayakumar P. Identification of ultrasonic frequency for water mist generation using piezoelectric transducer // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 83 (2). pp. 74–78.
3. Malgin Yu. V. Air humidification by fog (theory and practice on the example of an ultrasonic humidifier) // *S.O.K.* 2007. № 10. pp. 91–98.
4. Influence of liquid properties on ultrasonic atomization / A. Lozano et al. // *ILASS2017*. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/ILASS2017.2017.4588>.
5. Pakhomov G. B., Elfimova M. V., Tuzhikov E. N. Long-periodic auto-oscillatory processes during flame extinguishing by a highly dispersed water mist // *Technospheric safety*. 2023. № 4 (41). pp. 37–48.
6. Experimental and Numerical Study of Fire Suppression Performance of Ultral-Fine Water Mist in a Confined Space / T. Liang et al. // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 52. pp. 208–213.
7. Measurement of absolute oxygen concentration using tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) in very fine water mist / A. Awtry et al. // *Halon Options Technical Working Conference*, Albuquerque, New Mexico, May 4–6, 2004.
8. Suppression of hydrogen cloud explosion by micron-sized water mist / L. Yanchao et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47 (55). pp. 23462–23470.
9. Malgin Yu. V. Energy and dispersibility of the fog formed by an ultrasonic humidifier // *S.O.K.* 2020. № 3. pp. 56–59.
10. Miles R., Davies J., Reid J. Influence of the surface composition of mixed monolayer films on the water evaporation coefficient // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2016. Vol. 18 (29). pp. 19847–19858.
11. Frank E. *Evaporation of water: with emphasis on applications and measurements*. New York : CRC Press, 2018. 188 p.
12. Effect of organic films on water evaporation and condensation in aerosol / J. Davies et al. // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2013. Vol. 110 (22). pp. 8807–8812.
13. Smoke optical density meter “IOPD-5M” // *SPEK* : website. URL: <http://spec.ru/products/id/143> (date of application: 12.02.2025).
14. Eisner H., Brooks F., Quince B. Stabilization of water fogs // *Nature*. 1958. Vol. 182. P. 1724.
15. Dependencies for estimating the visibility range in aerosol environments / D. S. Fedorov et al. // *Defense Engineering Issues. Series 16: Technical means of countering terrorism*. 2019. № 9–10 (135–136). pp. 105–110.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пахомов Георгий Борисович, канд. хим. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 51866; e-mail: georgy400@yandex.ru

Елфимова Марина Владимировна, канд. техн. наук, доц., заместитель начальника института по научной работе Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 818459; e-mail: elfimovamv@uigps.ru

Тужиков Евгений Николаевич, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России, Россия (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 759898; e-mail: tujikoven@uigps.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Georgy B. Pakhomov, Cand. Sci. (Chemical), Senior Researcher, Research Department of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 51866; e-mail: georgy400@yandex.ru

Marina V. Elfimova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of Research of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 818459; e-mail: elfimovamv@uigps.ru

Evgenij N. Tuzhikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fire, Emergency and Rescue Equipment of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 759898; e-mail: tujikoven@uigps.ru

Поступила в редакцию 17.02.2025
Одобрено после рецензирования 20.02.2025
Принята к публикации 14.03.2025